7. *Golub G. H, Kahan W.* Calculating the singular values and pseudo-inverse of a matrix // *Milestones in Matrix Computation.* 2007. Vol. 2, No. 2. PP. 205–224.

Дементий Ю.А., Николаев К.П.
(Чебоксары, ООО «Релематика»)

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТРОЙКИ КОМПЕНСАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Для компенсации ёмкостного тока в распределительных сетях применяются дугогасящие реакторы (ДГР). Одним из типов реакторов является ДГР с плунжерным регулированием. Изменяемая индуктивность реактора настраивается в резонанс с ёмкостью сети, что приводит к компенсации ёмкостного тока [1]. Расстройка компенсации является величиной, показывающей степень компенсации ёмкостного тока сети индуктивным током реактора:

$$\vartheta = \left(\frac{i_C - i_L}{i_C} \right) 100\,\%\cdot, \qquad (1)$$

где ϑ – расстройка компенсации, %; i_C – ёмкостный ток сети, А; i_L – индуктивный ток реактора, А.

В настоящее время определение значения расстройки компенсации и настройка реактора в резонанс с ёмкостью сети осуществляются на основе следующих методов: экстремальный [2, 3]; импульсный [4]; метод наложения тока непромышленной частоты [5].

Существующие методы определения значения расстройки компенсации и настройки реактора основаны на анализе параметров контура нулевой последовательности сети (КНП) и процессов, протекающих в нём. Далее рассматривается задача определения значения расстройки на примере импульсного метода.

Импульсный метод работы основан на анализе параметров переходных процессов, протекающих в КНП. В нейтраль сети совместно с реактором устанавливается источник ЭДС, генери-

рующий кратковременные импульсы. Эти импульсы вызывают возмущения в КНП, в результате которых возникают переходные процессы, обусловленные обменом энергией между ёмкостью сети и индуктивностью реактора. Определение коэффициента затухания и частоты свободных колебаний переходных процессов позволяет вычислить значение расстройки по формуле

$$\vartheta = \left(1 - \frac{\omega_{\text{св}}^2 + \delta^2}{\omega_{\text{сети}}^2}\right) 100\,\%, \qquad (2)$$

где δ – коэффициент затухания переходного процесса, $с^{-1}$; $\omega_{\text{св}}$ – частота свободных колебаний переходного процесса, рад/с; $\omega_{\text{сети}}$ – частота сети, рад/с.

Результатом измерения является значение расстройки $\vartheta_{\text{измер}}$. На практике существует ряд факторов, которые препятствуют определению истинного значения расстройки, среди них: наличие случайных процессов; влияние шумов измерительных трактов. Наличие данных факторов не позволяет считать точечные оценки значения расстройки достоверными. Следует отметить, что эти факторы являются универсальными, поскольку они влияют на процесс определения значения расстройки при использовании любого метода настройки реактора. Всё это обуславливает актуальность задачи определения достоверного значения расстройки компенсации.

Одним из способов решения этой задачи является использование в качестве информации об её истинном значении измеренные значения расстройки. Влияние случайных процессов учитывается путём представления их в виде некого преобразования, принимающего на вход истинное значение расстройки:

$$\begin{gathered} F:\ \vartheta_{\text{реальн}} \to \vartheta_{\text{измер}}; \\ F\left(\vartheta_{\text{реальн}}\right) = \vartheta_{\text{измер}} + \varepsilon, \end{gathered} \qquad (3)$$

где F – преобразование, представляющее собой воздействие случайных процессов; $\vartheta_{\text{реальн}}$ – реальное значение расстройки, %; $\vartheta_{\text{измер}}$ – измеренное значение расстройки, %; ε – шумовая компонента, обусловленная наличием случайных процессов.

Принимается, что шумовая компонента ε, обусловленная наличием случайных процессов, является случайной величиной. Следовательно, измеренное значение расстройки $\vartheta_{измер}$, одной из составляющих которой является шумовая компонента, также будет случайной величиной.

В момент, когда плунжер реактора неподвижен и, соответственно, истинное значение расстройки не изменяется, можно проводить оценку статического значения расстройки.

Исходя из предположений о распределении шумовой компоненты ε, предлагается несколько вариантов интервальной оценки значения расстройки. Если шумовая компонента распределена по нормальному закону, в качестве точечной оценки значения расстройки можно использовать выборочное среднее, которое при увеличении количества измерений стремится к математическому ожиданию значения расстройки [6].

Для определения достоверных значений расстройки предлагается использовать интервальную оценку. Интервальную оценку можно провести с помощью механизма доверительных интервалов [7]. Для построения доверительного интервала используется распределение Стьюдента [7]:

$$\left(\overline{\vartheta} - t^{*}_{\text{ppf}}(n, \alpha)\frac{s}{\sqrt{n}}, \overline{\vartheta} + t^{*}_{\text{ppf}}(n, \alpha)\frac{s}{\sqrt{n}}\right),$$

где $\overline{\vartheta}$ – выборочное среднее; s – выборочное стандартное отклонение; n – размер выборки; $t^{*}_{\text{ppf}}(n, \alpha)$ – α-квантиль распределения Стьюдента с количеством степеней свободы n.

Достоверность регулируется с помощью параметра α, называемого уровнем доверия и соответствующего вероятности попадания математического ожидания в доверительный интервал.

Однако нельзя утверждать, что шумовая компонента, обусловленная наличием случайных процессов, имеет нормальное распределение. Следовательно, использование выборочного среднего, лежащего в основе построения доверительного интервала с применением распределения Стьюдента не гарантирует верное построение интервальной оценки.

В случае, когда значение расстройки распределено по закону, отличному от нормального, в качестве границ доверительно-

го интервала можно использовать оценки квантилей разных уровней [8]. Применение квантилей в качестве границ доверительного интервала является универсальным методом, поскольку позволяет настраивать границы интервала, учитывая распределение шумовой компоненты.

В случае динамического регулирования плунжер изменяет своё положение, следовательно, истинное значение расстройки также изменяется. В связи с этим вычисление выборочного среднего расстройки в данном случае нецелесообразно. Изменение расстройки во время движения плунжера можно учесть, например, с помощью линейной модели, описывающей связь значений расстройки и времени.

Коэффициенты линейной регрессии вычисляются по известным значениям моментов времени и измеренным значениям расстройки. Линейная модель позволяет рассчитать предсказательный интервал регрессии, который может использоваться в качестве доверительного интервала.

Таким образом, механизм интервальной оценки может быть реализовн с помощью инструментария математической статистики и использован для получения достоверных значений расстройки компенсации.

Одной из задач информационной теории релейной защиты [9] является определение граничной линии образа отображения области определения имитационной модели объекта (ИМО): необходимо, используя функции ИМО и замера и диапазоны допустимых значений объектных параметров модели, получить граничную линию образа отображения.

На вход функции ИМО подаётся d-мерный вектор объектных параметров $\mathbf{x}:\mathbf{x}\in G\subset C$, где G – область определения ИМО, C – пространство, образованное векторами объектных параметров (объектное пространство). Затем на выходе имитационной модели объекта формируются величины, которые посредством функции замера преобразуются в n-мерный вектор замера (наблюдаемых величин) $\mathbf{v}:\mathbf{v}\in S\subset A$, где S – образ отображения, A – наблюдаемое (уставочное) пространство. Так преобразованием F, объединяющем функции ИМО и замера, вектор $\mathbf{x}$ преобразуется в вектор $\mathbf{v}$:

$$F : \mathbf{x} \to \mathbf{v}; \quad G \to S.$$

Область определения ИМО задаётся двумя векторами $\mathbf{x}_{\min}$ и $\mathbf{x}_{\max}$, содержащими минимальные и максимальные значения объектных параметров соответственно. Таким образом, область определения представляет собой d-мерный гиперпрямоугольник.

В случае одномерного наблюдаемого пространства границы образа отображения будут представлены двумя значениями, являющимися границами интервала возможных значений образа.

Задача определения достоверного значения расстройки компенсации является задачей, обратной определению граничной линии для одномерных объектного и наблюдаемого пространств [10]. В качестве вектора объектных параметров $\mathbf{x}$ выступает вектор истинных значений расстройки $\vartheta_{\text{реальн}}$, в качестве вектора наблюдаемых величин - вектор измеренных значений расстройки $\vartheta_{\text{измер}}$, роль преобразования F выполняет воздействие случайных процессов. При этом наблюдаемое A и объектное C пространства будут представлять собой полуинтервал $(-\infty,100]$, т.е. $\vartheta \in (-\infty,100]$, что становится понятным из анализа формулы (1).

В информационной теории релейной защиты существуют методы, предназначенные для расширения информации об объекте, однин из таких методов основывается на применении алгоритмических моделей. Алгоритмические модели позволяют из наблюдаемых величин получить величины, которые наблюдать в данный момент не представляется возможным, и тем самым расширяют объем информации об объекте.

В режиме динамического регулирования для получения достоверных значений расстройки необходимо измерить значения расстройки в как можно большем количестве положений плунжера. В определённом положении плунжера возможно замерить значения, соответствующие лишь одному истинному значению расстройки, использование же значений расстройки в предыдущих положениях плунжера позволяет получить значение расстройки в положении, которое невозможно в данный момент времени, что напоминает применение алгоритмических моделей.

Таким образом, обсуждается задача определения достоверного значения расстройки, актуальность которой обусловлена влиянием случайных процессов в объекте и шума измерительных трактов на точность определения параметров КНП, используемых для вычисления расстройки.

Использование интервальной оценки позволяет получить значение расстройки с указанной степенью достоверности. Описаны способы получения интервальной оценки в режиме статического регулирования. В этом случае предлагается получать интервальные оценки с помощью механизма доверительных интервалов или оценок квантилей разного уровня. В режиме динамического регулирования предлагается получать интервальную оценку с помощью линейной модели, описывающей изменение значения расстройки во времени, и получения её предсказательных интервалов.

Проведено сравнение задач определения достоверного значения расстройки и задачи получения граничной линии образа отображения. Выяснено, что задачи являются обратными. Использование алгоритмических моделей и предложенный принцип динамического регулирования выполняют аналогичную задачу увеличения объема информации. Задача определения достоверного значения расстройки является подзадачей получения граничной линии образа. Положения информационной теории релейной защиты распространяются на задачу определения достоверного значения расстройки.

Постановка задачи определения достоверного значения расстройки в терминах информационной теории релейной защиты позволяет с другой стороны посмотреть на данную задачу и открывает возможности для применения методов информационной теории релейной защиты для ее решения.

Литература

1. *Черников А. А.* Компенсация ёмкостных токов в сетях с незаземлённой нейтралью. М.: Энергия, 1974. 96 с.

2. *Брызгин О. Р.* Фазовый метод настройки компенсации в электрических сетях при замыкании на землю // Проблемы технической электродинамики. Киев: Наук. Думка, 1970. Вып. 26. С. 19-23.

3. *Степанчук Д. Н.* Повышение точности настройки дугогасящих реакторов экстремальными регуляторами // Электроэнергетика и автоматизация промышленных установок. Донецк: Изд-во ДПИ, 1974. С. 23–27.

4. *Соловьёв И. В.* Совершенствование управления компенсацией ёмкостных токов замыкания на землю в распределительных электрических сетях: дис. … канд. техн. наук / Соловьёв И.В. Чебоксары, 2014. 226 с.

5. *Вайнштейн Р. А., Аньков С. Е.* Непрерывный контроль автоматическая настройка компенсации ёмкостных токов с использованием наложенного тока частоты 25 Гц // Режимы нейтрали в электрических системах. Киев: Наук. Думка. 1974. С. 115–120.

6. *Etemadi N.* An elementary proof of the strong law of large numbers. Z. Wahrscheinlichkeitstheorie verw Gebiete 55, 1981. PP. 119–122.

7. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2003. 479 с.

8. *Прохоров Ю. В.* Вероятность и математическая статистика: Энциклопедия. М: Большая российская энциклопедия, 2003. 912 с.

9. Граничные задачи в информационной теории релейной защиты / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электротехника. 2011. №1. С. 13–18.

10. *Дементий Ю. А., Шорников Е. В.* Машинное обучение для интервальной оценки параметров объекта // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: Материалы III Междунар. науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2021». Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. С. 153–157.